

УДК 624.012.45

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ НАГЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кривицкий П.В., Мирончук В.С.

Введение. В мировой практике [1, 2, 3] сопротивление срезу балочных изгибаемых элементов определяется вертикальными составляющими усилий, возникающих в бетоне и поперечной арматуре, определяемых по эмпирическим или аналитическим зависимостям. Существующее в настоящее время разнообразие моделей и методов определения предельной поперечной силы в наклонном сечении железобетонных балочных элементов свидетельствует об отсутствии единого подхода, который позволил бы учесть влияние всех выявленных составляющих усилий материалов в сопротивлении срезу, в частности – вертикальное (нагельное) усилие в продольной рабочей арматуре. Несмотря на это, в основу всех методик определения сопротивления срезу железобетонных балочных конструкций положены два направления: первое направление основывается на предпосылках и зависимостях метода ферменной аналогии *Ritter-Mörsch* и метода предельных усилий, а другое – на базовых условиях и допущениях метода деформационной модели.

В ряде нормативно-технических документов [4, 5, 6, 7] при определении сопротивления изгибаемых элементов срезу предлагается отдельно выполнять расчет для балочных конструкций с поперечным армированием и без него. В большинстве из них при оценке предельной поперечной силы для балочных элементов без поперечного армирования используются эмпирические зависимости, рассматривающие один вид внутренних усилий. Для изгибаемых элементов с поперечным армированием применяется модифицированная модель ферменной аналогии с переменным углом. Однако, независимо от поперечного армирования в нормативно-технической литературе влиянием вертикальной составляющей усилия, возникающей в продольной арматуре, пренебрегают.

Расчетные модели сопротивления срезу с учетом нагельного эффекта. В 1991 году К. Н. Reineck [8] на основе гребенчатой модели G. N. Kani и модели ферменной аналогии E. Mörsch предложил модель, в которой позволяет рассчитывать «гибкие» (пролетом среза $a/d \geq 2,5$) железобетонные элементы без поперечного армирования. Железобетонная конструкция, согласно механической модели К. Н. Reineck, делится на балочные элементы («зубья»), образованные отдельными трещинами, и рассматриваются уравнения равновесия внутренних усилий в условиях плоского напряженного состояния (двухосное растяжение-сжатие), используя модель ферменной аналогии [8].

В уравнении равновесия вертикальных сил приопорной части элемента присутствует поперечное усилие, возникающее в продольной арматуре, за счет нагельного эффекта, определяемое по формуле:

$$V_d = \frac{6}{\sqrt[3]{f'_c}} \cdot b_n \cdot d_b \cdot f'_{ct}, \quad (1)$$

где $b_n = b_w - \sum d_b$ – ширина сечения нетто;

d_b – диаметр арматуры;

f'_c и f'_{ct} – средняя прочность бетона осевому сжатию и растяжению соответственно.

Результатом экспериментально-теоретической работы P. G. Gambarova, S. Dei Poli, M. D. Prisco [9, 10] стала модель, где принимается не совпадение главных напряжений и деформаций. Авторы выделяют из общей системы (ферменной модели) сжатую полосу под углом ϕ к продольной оси элемента, которая воспринимает распределенный по высоте изги-

бающий момент M , продольную N_B и поперечную V_B силы, вызванные собственной изгибной жесткостью арматуры и силами сцепления бетона с поперечной арматурой.

В рамках предлагаемой модели [9, 10] из уравнения равновесия изгибающих моментов определяются предельные величины касательных напряжений, воспринимаемых сжатой полосой. Вклад касательных напряжений $\Delta \tau_D$, возникающих в продольной арматуре из-за нагельного эффекта, в предельную величину можно оценить через поперечное усилие по следующей зависимости:

$$V_D = \gamma \cdot k_D \cdot \delta_V \leq V_D^{\max}, \quad (2)$$

где γ – коэффициент, зависящий от деформативных свойств бетона и арматуры;

k_D – коэффициент, учитывающий эффект «ужесточения» работы поперечной и продольной арматуры совместно с бетоном;

δ_V – деформации сдвига сжатой полосы относительно центра тяжести продольной арматуры;

$V_D^{\max} = 1.74 b_n \cdot d_b \cdot f_c^{0.33}$ – предельная поперечная сила, воспринимаемая продольной арматурой за счет нагельного эффекта.

В 70-х годах XX века А. С. Залесовым [11, 12] был предложен метод расчета прочности железобетонных элементов на действие поперечных сил. Он базируется на формировании так называемой дисково-связевой расчетной модели предельного состояния, в которой учитывается поперечное (нагельное) усилие, возникающее в продольной арматуре. В зависимости от формы разрушения (раздробление или срез бетона) по [11] рассматриваются особенности распределения внутренних усилий в наклонной трещине и соответствующие уравнения равновесия. Для случая разрушения сжатой зоны бетона над наклонной трещиной нагельное усилие в продольной арматуре, принимается как балка на упругом основании, в качестве основания которой выступает бетон двух блоков (B_1 и B_2) дисково-связевой модели. Тогда нагельное усилие может быть определено по формуле:

$$V_s = \frac{12 E_s \cdot I_s}{l_{s,Q}^3} \cdot l_{inc,cr} \cdot (\varphi_{B1} - \varphi_{B2}) \cdot \left(1 + \frac{l_1 - 0,5l}{l_{inc,cr}}\right), \quad (3)$$

где E_s, I_s – модуль деформаций и момент инерции продольной арматуры;

$l_{s,Q} = l_1 + l_2$ – длина изгиба стержня, определяемая коэффициентами постели основания;

$l_1 \approx 6\varnothing, l_2 \approx 2,5\varnothing$ – длины изгиба стержня в бетоне блоков B_1 и B_2 соответственно;

$l_{inc,cr}$ – горизонтальная проекция наклонной трещины;

$\varphi_{B1}, \varphi_{B2}$ – углы вращения блоков B_1 и B_2 дисково-связевой модели относительно вершины наклонной трещины.

Для элементов без поперечной арматуры или с небольшим ее количеством, согласно [11], характерен вариант разрушения вследствие среза бетона над наклонной трещиной (рисунок 1). Поперечное усилие (нагельный эффект) в продольной арматуре в случае среза сжатого бетона по предложению А. С. Залесова следует определять по формуле:

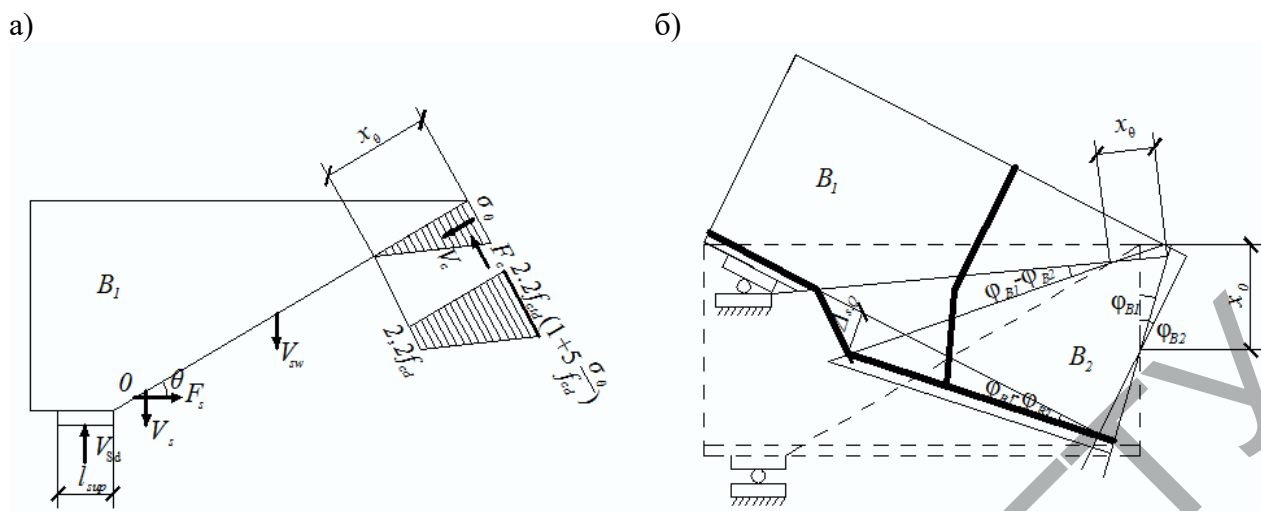
$$V_s = \frac{R_{sh} \cdot \tan \theta \cdot a \cdot 0,05 E_s \cdot A_s}{l_{s,Q} \cdot G_c}, \quad (4)$$

где $R_{sh} = 2,2 f_{ctd} \cdot (1 + 5 \sigma_\theta / f_{ctd}) \leq 0,5 f_{ctd}$ – прочность бетона на срез;

G_c – модуль сдвига бетона;

σ_θ – нормальные напряжения в бетоне у наиболее сжатой грани в направлении продолжения диагональной трещины;

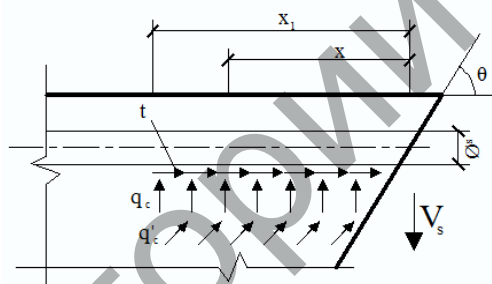
a – пролет среза.



а) – расчетная модель; б) – кинематическая схема

Рисунок 1. – Модели предельного равновесия в наклонном сечении при срезе бетона [11]

Схожая модель определения нагельного усилия в продольной арматуре предложена К. А. Зиновым [13, 14], где арматурный стержень рассматривается как упругопластическая балка на пластическом основании, в которой реактивные усилия сжатия q'_c направлены параллельно наклонной трещине (рисунок 2).



а) – внутренние усилия в наклонном сечении;
б) – расчетная схема при смешанном армировании

Рисунок 2. – К определению нагельного эффекта согласно К. А. Зинову [13, 14]

Нагельное усилие в стержне продольной арматуры авторы [13, 14] предлагают определять итерационным путем по выражению:

$$V_s = (M_{\max} + m \cdot x + q_c \cdot x^2 / 2) / x, \quad (5)$$

где $M_{\max} = M_{pl} = W_{pl} \cdot f_{yd} \cdot k_n$ – максимальный изгибающий момент в продольной арматуре в момент появления в ней при перегибе пластического шарнира;

$m = f_{cd,loc} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \varnothing_s^2 / 2$ – распределенный изгибающий момент в арматуре от касательной составляющей t реактивного усилия q'_c ;

$W_{pl} = 0,1 \cdot k \cdot \varnothing_s^3$ – упругопластический момент сопротивления стержня;

$x = (V'_s - m) / q_c$ – место расположения расчетного сечения;

$q_c = f_{cd,loc} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \varnothing_s$ – распределенное нормальное сжимающее усилие в бетоне от реактивного усилия q'_c ;

$V'_s = \sqrt{2q_c \cdot W_{pl} \cdot k \cdot f_{yd}}$ – начальное значение нагельного усилия;

k_n, k – коэффициенты, учитывающие влияние соответственно продольного усилия

$k_n = 1 - (N_s / f_{yd})^2 \cdot A_{st}$ и формы поперечного сечения стержня ($k=2,0$ – для круглого сечения);

$f_{cd,loc} = (3,0 \div 3,5) \cdot f_{cd}$ – расчетная прочность бетона при местном сжатии.

Выводы. Анализируя разнообразие моделей и на их основе подходы можно сделать вывод, что современные методы определения предельной поперечной силы в наклонной трещине железобетонных конструкций позволяют достоверно и точно описать механизм передачи среза. Попытка моделей и теорий учесть все возможные составляющие по материалам в сопротивлении срезу дает возможность описать работу железобетонных балочных элементов в условиях сложного плоского напряженно деформированного состояния, предлагая при этом различные варианты рационального армирования. Тем не менее, предлагаемые эмпирические зависимости к определению вклада нагельного эффекта продольной арматуры в сопротивлении срезу отличаются сложностью применения и не учетом ряда факторов, что не позволяет использовать данные зависимости в нормативных документах и в реальном проектировании. Усовершенствование подходов позволит повысить точность применяемых методик и зачастую снизить материалоемкость конструкций.

Список источников

1. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : СП 63.13330.2012 (Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). – Введ. 01.01.2013. – М. : Минрегион РФ, 2011. – 155 с.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials Standard Specifications for Highway Bridges, 16th ed. (including interim revisions for 1997 through 2002). – Washington, 2002. – 756 p.
3. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (318R-14) : ACI Committee 318. – MI ; Farmington Hills : American Concrete Institute, 2014. – 519 p.
4. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ В.2.6-156:2010. – Введ. 01.06.2011. – М. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
5. Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings : EN 1992-1-1 (Eurocode № 2). – Commission of the European Communities, 2002. – 230 p.
6. Model Code 2010 – First complete draft. – Vol. 1. – fib Bull. 55. – 318 p.
7. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 1: Design) : DIN 1045-1. – Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2001. – 148 p.
8. Reineck, K.-H. Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model / K.-H. Reineck // ACI Structural Journal. – Sept.-Oct., 1991. – Vol. 88, № 5. – P. 592-602.
9. Dei Poli, S. Stress field in web of RC thin-webbed beams failing in shear / S. Dei Poli, M. Di Prisco, P. G. Gambarova // Journal of Structural Engineering. – Sept., 1990. – Vol. 116, № 9. – P. 2496-2515.
10. Di Prisco, M. Comprehensive model for study of shear in thin-webbed RC and PC beams / M. Di Prisco, P. G. Gambarova // Journal of Structural Engineering. – Dec., 1995. – P. 1822-1831.
11. Залесов, А. С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А. С. Залесов, Ю. А. Климов. – К. : Будивэльнык, 1989. – 104 с.
12. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А. С. Залесов [и др.]. – М. : Стройиздат, 1988. – 320 с.
13. Зинов, К. А. Прочность железобетонных балок без поперечного армирования с двузначной эпюрой изгибающих моментов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / К. А. Зинов ; Ленинградский ордена политехн. ин-т им. М. И. Калинина. – Ленинград, 1988 – 24 с.
14. Малиновский, В. Н. Расчет прочности железобетонных элементов по наклонному сечению на действие поперечной силы с учетом нагельного эффекта в арматуре / В. Н. Малиновский, К. А. Зинов // Современные строительные конструкции. Проблемы строительства : сб. труд. XIX научно-технической конференции / Брестский политехн. ин-т ; редкол. : В. И. Драган (отв. ред.) [и др.]. – Брест, 1995. – С. 28–33.